

# EUROPEAN PATENT OFFICE

## Patent Abstracts of Japan

PUBLICATION NUMBER : 11167036  
PUBLICATION DATE : 22-06-99

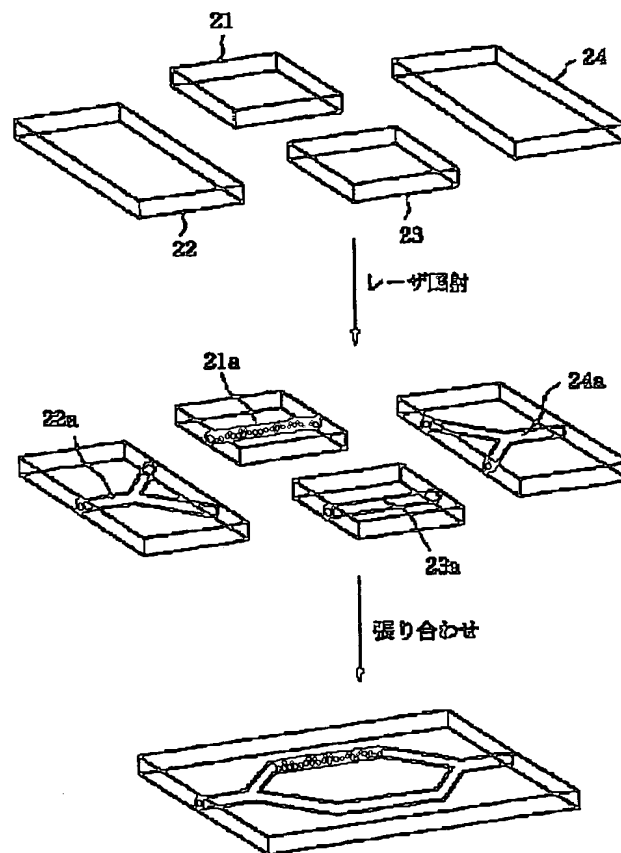
APPLICATION DATE : 04-12-97  
APPLICATION NUMBER : 09333784

APPLICANT : SUGIMOTO NAOKI;

INVENTOR : HIRAO KAZUYUKI;

INT.CL. : G02B 6/13 G02B 6/12 G02F 1/313  
G02F 1/35

TITLE : OPTICAL WAVEGUIDE CIRCUIT AND  
NONLINEAR OPTICAL DEVICE



ABSTRACT : PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an optical waveguide circuit where an optical waveguide even in a complicated shape is easily written.

SOLUTION: A  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -containing glass material 21 having large three-dimensional nonlinear optical effect is used as a base body or part of the base body and a part 21a which is varied in refractive index by convergent irradiation with laser light is formed as an optical waveguide in the base body. The optical waveguide is branched in, for example, a two-pronged shape and one of the branched optical waveguides is formed in the  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -containing glass material. Consequently, this is built in an optical Kerr shutter type switch, a Mach-Zehnder type switch, a directional coupler type switch, etc., to constitute an optical switch with quick response.

COPYRIGHT: (C)1999,JPO



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  を含むガラス材料を基体又は基体の一部とし、レーザ光の集光照射によって屈折率を変化させた部分が光導波路として基体内部に形成されている光導波回路。

【請求項2】 請求項1記載のガラス材料が  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  : 15~70モル%,  $\text{MgO} + \text{ZnO} + \text{BaO}$  : 0~40モル%,  $\text{B}_2\text{O}_3$  : 0~75モル%,  $\text{SiO}_2$  : 0~60モル%,  $\text{Li}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  : 0~20モル%,  $\text{TiO}_2$  : 0~20モル%,  $\text{CeO}_2$  : 0~10モル%の組成をもつ光導波回路。

【請求項3】 光導波路が二股状に分岐し、分岐した一方の光導波路が  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  含有ガラス材料である請求項1又は2記載の光導波回路。

【請求項4】 偏光子を介した入射光と共にゲート光が光導波路に入射され、光導波路を通過した入射光を検光子を介して出射光として取り出す光カーシャッタスイッチにおいて、請求項1又は2記載の光導波回路を使用する非線形光学装置。

【請求項5】 入射したレーザ光を分波し、非線形媒質からなる光導波路に分波された一方の光波を通過させて位相シフトを与え、位相シフトを与えていない他方の光波と合波させ、入力光に変調が加わった出力光を得るマッハ・チェンダ型光スイッチにおいて、請求項1~3の何れかに記載の光導波回路を使用する非線形光学装置。

【請求項6】 近接した2本の導波路のうち一つを非線形導波路とし、一方の導波路に入射された光波モードが他方の導波路に入射された光波モードと結合し、両モード間で起きる伝送光エネルギーの移動により出射端からの光エネルギーをオン・オフする方向性結合器型光スイッチにおいて、請求項1~3の何れかに記載の光導波回路を使用する非線形光学装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は、光データ処理、情報処理、光通信システム等の光スイッチ、光メモリ、光信号演算処理装置等として有用な光デバイスに関する。

## 【0002】

【従来の技術】 光通信や光情報処理では、情報等の信号を光で搬送するためには変調、スイッチング等の光制御が必要になる。この種の光制御には、電気信号を用いた電気-光制御方法が従来から採用されている。しかし、電気-光制御方法は、電気回路のようなCR時定数による帯域制限、素子自体の応答速度や電気信号と光信号との間の速度の不釣り合いで処理速度が制限されること等の制約があり、光の利点である広帯域性や高速性が十分に活用できていない。制約を解消し、光の広帯域性や高速性を十分に活かすためには、光信号によって光信号を制御する光-光制御技術が非常に重要になってくる。こ

の要求に応えるものとして期待されている三次非線形光学材料は、屈折率、吸収係数等の光学的性質が光によって変化する原理を利用したものであり、光を光で制御できる特質をもち、光通信、光交換、光コンピュータ、光インターコネクション等における光スイッチ等として検討されている。

【0003】 三次非線形光学材料に要求される特性は、一般的に三次非線形感受率、スイッチング素子の相互作用長、入射光強度である。三次非線形感受率が高いほど、チング素子の相互作用長が長いほど、入射光強度が高いほど、光学的性質の変化量が大きくなる。しかし、相互作用長を長くすることは、素子長が長くなることを意味し、素子が大きくなるという欠陥になる。また、入射光の強度を強くすることは、半導体レーザの開発状況に依存する点が多く、消費電力を増加させることにもなるので、経済上で好ましくない。このような観点から、三次非線形光学効果の大きな材料の探索が精力的に進められており、GaAsのような半導体単結晶やポリジアセチレンのような有機単結晶、量子サイズ効果を利用した微粒子分散ガラス、半導体量子井戸構造、石英ガラス、カルコゲナイドガラス等、種々の材料が光スイッチとして提案されている。

【0004】 一方、光-光制御の高速性を十分に活かすためには、非線形緩和時間 $\tau$ が十分に小さいことが必要である。緩和時間 $\tau$ が長いと、系全体の回復に長時間がかかり、結果として高速のスイッチングができなくなる。この点、微粒子分散ガラス、半導体量子井戸構造等の共鳴型三次非線形光学材料は、三次非線形感受率が高いものの、緩和時間 $\tau$ が長いことが欠点である。これに対し、石英ガラス、カルコゲナイドガラス等の非共鳴型三次非線形光学材料は、光吸収を伴わないため応答時間が数百フェムト秒( $10^{-13}$  秒)と極めて短く、超高速のスイッチング素子として極めて有利な材料であるといえる。また、光の吸収係数が小さいことも、超高速スイッチング素子として有利な点である。しかし、石英ガラス、カルコゲナイドガラス等の非共鳴型三次非線形光学材料では三次非線形感受率が小さいため、光スイッチとしての使用に際してはデバイス長を長くし或いは動作パワーを大きくする必要があった。そこで、非共鳴型のガラスにおいても、三次非線形光学効果の大きな材料の探索が積極的に進められている。最近の研究では、カルコゲナイドガラスであるAs-S系のガラスが大きな三次非線形感受率を示すことから、石英ガラスに比較して約1/1000の長さのファイバーで同等な高速スイッチング動作が可能であることも報告されている。しかし、カルコゲナイドガラスでは、ガラス製造時の雰囲気制御する必要があり、有害元素を含むために環境を汚染する虞れもあること等から、ガラスの製造プロセスが煩雑になることが問題である。

## 【0005】

【発明が解決しようとする課題】光導波路用に三次非線形媒質を使用すると、光スイッチの相互作用長を長くでき、狭い空間に光を閉じ込めることにより光の強度を増大できる。これらの特質により三次非線形光学材料自体の低い非線形感受率が補われるため、三次非線形媒質の使用は有効な手段の一つとして考えられている。三次非線形媒質に光導波路を作り込む方法としては、イオン交換法や火炎加水分解法等が採用されている。

【0006】イオン交換法では、たとえば金属膜のスリット状開口からガラス基板表面層に $Ag^+$ イオンを熱的に侵入させ、ガラス中の $Na^+$ イオンと $Ag^+$ イオンを交換する第1段のイオン交換で表面層に導波核を形成した後、ガラス基板に均一な電界を印加して熔融塩中の $Na^+$ イオンをガラス表面に侵入させている。 $Na^+$ イオンは、 $Ag^+$ イオンが形成した最表面の高屈折領域を表面下に移動させる。その結果、導波路がガラス表面下に埋め込まれ、低伝播損失特性が確保される。この方法で作製された光導波路のコア部は、通常、直径が $10\sim 200\mu m$ の半円形又はほぼ円形の断面を持ち、1%前後の比屈折率差を示すものが多い。イオン交換法で作製される導波路は、ガラス表面に近い部分に限られる。導波路作製可能なガラス材料も、イオン交換可能な材料に限られる。更に、イオン交換に長時間を要するため、生産性も低い。しかも、同一基板上に種々の二次元的なパターンをもつ光導波路を作製できても、三次元的に組み合わせられた光導波路の形成は困難である。そのため、光導波路等としての使用が制約され、複雑な回路構成をもつ用途に適用できない。その結果、ガラス材料を用いた光デバイスの構成に際し、材料本来の高い非線形光学特性が十分に発揮されていない。

【0007】火炎加水分解法では、四塩化シリコン及び四塩化ゲルマニウムの火炎加水分解によりシリコン基板の表面に下クラッド用及びコア用の二層のガラス微粒子層を堆積させ、高温加熱によって微粒子層を透明ガラス層に改質する。次いで、フォトリソグラフィ及び反応性エッチングにより回路パターンをもつコア部を形成する。この方法で作製された光導波路は、膜厚が数 $\mu m$ である。火炎加水分解法による場合には、導波路の作製工程が複雑であり、使用可能な材料も石英を主成分とするガラス組成に限られる。また、イオン交換法と同様に、三次的に組み合わせられた光導波路を形成することが困難である。

【0008】また、レーザ光をガラス材料の内部に集光照射させることにより、光導波路を作製する技術がヨーロッパ特許第0797112公開明細書で報告されている。この方法は、イオン交換法や火炎加水分解法に比較して材料の制約が大幅に緩和され、三次非線形光学効果の高い材料の使用によって三次非線形光導波路の作製が可能になることが予想される。しかし、従来から使用されている三次非線形光学材料は前述したように三次非線

形感受率自体が小さく、また三次非線形感受率の高い材料では有害成分を含むことが問題である。本発明は、このような問題を解消すべく、有害成分を含まず通常の製造プロセスで作製可能な $Bi_2O_3$ 含有ガラスを三次非線形光学材料として使用し、ガラス材料の内部でレーザ光の集光点を相対的に移動させることにより、屈折率変化をもたらし構造変化をガラス材料の内部に起こさせ、必要形状の光導波路が簡便に形成された光導波回路を提供することを目的とする。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明の光導波回路は、その目的を達成するため、 $Bi_2O_3$ 含有ガラス材料を基体又は基体の一部とし、レーザ光の集光照射によって屈折率を変化させた部分が光導波路として基体内部に形成されていることを特徴とする。光導波路は、たとえば二股状に分岐され、分岐した一方の光導波路が $Bi_2O_3$ 含有ガラス材料の内部に形成されている。この光導波回路は、光カーシャッタ型スイッチ、マッハ・チェンダー型スイッチ、方向性結合器型スイッチ等に組み込まれ、応答性の高い光スイッチを構成する。

【0010】

【実施の形態】本発明者等は、レーザ光の集光照射で作製した光導波路の光スイッチング特性について調査検討した結果、本発明に達した。本発明に従った光導波路は、レーザ光の集光照射により屈折率変化がガラス材料の内部に連続して形成されている。このように光導波路を形成するとき、従来の複雑な工程を経る必要なく導波路型超高速光スイッチ等の非線形光学装置が簡便に作製される。作製された三次非線形光学装置は、光カーシャッタスイッチ、マッハ・チェンダー型光スイッチ、方向性結合器型光スイッチ等として使用可能であり、何れも三次非線形光学効果を利用することにより超高速の光スイッチング動作が可能である。三次非線形光学装置用の光導波路を作製するためのガラス材料には、透明度が高く且つ三次非線形光学効果の大きな $Bi_2O_3$ を含むガラス材料が使用される。透明度が高く三次非線形光学効果の大きな材料としてAs-S系のカルコゲナイドガラスが知られているが、このガラスは、前述したようにガラス製造時の雰囲気制御を必要とし、しかも環境を汚染する虞れのある有害元素を含むことから、製造プロセスを複雑にするため好ましくない。

【0011】 $Bi_2O_3$ 含有ガラスとしては、次の組成をもつガラスが使用される。

$Bi_2O_3$  :  $15\sim 70$ モル%

$MgO+ZnO+BaO$  :  $0\sim 40$ モル%

$B_2O_3$  :  $0\sim 75$ モル%

$SiO_2$  :  $0\sim 60$ モル%

$Li_2O+Na_2O+K_2O$  :  $0\sim 20$ モル%

$TiO_2$  :  $0\sim 20$ モル%

$CeO_2$  :  $0\sim 10$ モル%

$\text{Bi}_2\text{O}_3$  の含有量が15モル%未満では期待する三次非線形光学効果が得られず、逆に70モル%を超える $\text{Bi}_2\text{O}_3$  含有量ではガラス化が困難になる。

【0012】必要に応じて $\text{MgO}$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{BaO}$ を添加することにより、結晶化が抑制されガラス形成が容易になる。しかし、合計量が40モル%を超える多量の $\text{MgO}$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{BaO}$ を添加すると、期待する三次非線形光学効果が得られ難くなる。 $\text{B}_2\text{O}_3$  も同様に結晶化抑制によりガラス形成を容易にするが、75モル%を超える多量添加では期待する三次非線形光学効果が得られ難くなる。 $\text{SiO}_2$  も同様に結晶化抑制によりガラス形成を容易にするが、60モル%を超える多量添加では期待する三次非線形光学効果が得られ難くなる。 $\text{Li}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ は単独で又は組み合わせて添加され、ガラス製造時の結晶化を抑制し、ガラスの形成を容易にする。しかし、 $\text{Li}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ の合計添加量が20モル%を超えると、ガラスの化学的耐久性が劣化すると共に、期待する三次非線形光学効果が得られ難くなる。 $\text{TiO}_2$ を添加するとガラス製造時の結晶化が抑制され、ガラスの形成が容易になる。 $\text{TiO}_2$ 添加は、三次非線形光学効果の増大にも有効である。しかし、20モル%を超える多量の $\text{TiO}_2$ を添加すると、ガラス形成が困難になる。 $\text{CeO}_2$ は、必要に応じて添加される成分であり、ガラス組成に含まれている $\text{Bi}_2\text{O}_3$ がガラス融解時に金属ビスマスとして析出することを抑制する作用を呈し、ガラスの透明度低下を防止する。しかし、10モル%を超える多量の $\text{CeO}_2$ を添加すると、ガラス形成が困難になるばかりでなく、三次非線形光学効果が低下する。

【0013】原料粉末を所定の組成に調整したガラス組成物は、適宜の方法によってガラスに製造される。ガラス製造法は特に制限されるものではないが、たとえば所定組成に配合した原料を白金ルツボ、石英ルツボ、イリジウムルツボに入れ、900～1300℃で空气中で熔融し、得られた融液をモールドにキャストすることによってガラスが作製される。或いは、溶融法以外のゾルゲル法や気相蒸発法によってもガラスが作製される。

【0014】本発明に従った光導波路は、光誘起屈折率変化を起こすエネルギー量をもつレーザ光をガラス材料の内部に集光し、連続した屈折率変化領域がガラス材料の内部に形成されるように、ガラス材料の内部で集光点を相対移動させることにより製造される。具体的には、図1で模式的に示すように、レーザ光11を集光レンズ12等からなる集光装置で集光し、ガラス材料10の内部に集光点13を位置させる。集光点13をガラス材料10の内部で相対的に移動させることにより、図2又は図3に示すように光導波路14、15として働く連続した屈折率変化領域がガラス材料10の内部に形成される。集光点13の相対移動には、たとえばレーザ光11の集光点13に対してガラス材料10を連続的に移動さ

せる方式、ガラス材料10の内部でレーザ光11の集光点を連続的に移動させる方式等が採用される。ガラス材料10の内部に形成される光導波路は、集光点13の相対移動に応じて自由に設計される。たとえば、集光点13を一方向に相対移動させると、図2に示す光導波路14が形成される。また、集光点13を二方向に相対移動させると、図3に示す二股状の光導波路15が形成される。光誘起屈折率変化は、ピークパワー強度が高いほど促進される。しかし、過度に大きなエネルギー量のレーザ光を得ることは実際面で困難である。この点は、パルス幅を狭くしてピーク出力を高めたレーザ光を使用することにより克服できる。ただし、パルス状のレーザ光を使用するとき、ガラス材料の内部に形成される光導波路を滑らかな構造にするため、パルスレーザの繰返し周波数を1kHz以上にすることが好ましい。

【0015】

【作用】パルスレーザの照射によって屈折率に変化する現象は、光誘起屈折率変化と呼ばれており、P、Ce、Ge等を添加したシリカガラスの例が知られている。この現象は、紫外域に固有吸収をもつ酸素欠陥がガラス中に存在しており、吸収波長のレーザを照射することによって酸素欠陥の一部が構造変化することに起因すると考えられており、発振波長が紫外域にあるエキシマレーザでの研究が進められている。しかし、この方法で使用されるレーザ光は、1kHz未満の低い繰返し周波数であるため、十分なエネルギーを照射部分に与えることができない。そのため、屈折率変化領域の形状がスポット的になり、連続的な屈折率変化を必要とする光導波路を形成するまでには至らない。また、パルス幅が一定の状態に強制的に繰返し周波数を高くすると、パルス当りのエネルギーが低くなり、屈折率変化を誘起させること自体が困難になる。ところで、パルスレーザのパルス幅を狭くすると、高いピーク出力が得られる。ピーク出力を高めると、ガラスの固有吸収以外の波長をもつパルスレーザ光を使用しても、1kHz以上の繰返し周波数をもつ限りガラス組成に関係なく、レーザ光の集光部分で屈折率が変化する現象が確認されている。滑らかな導波路構造を形成する上では、第1パルスと第2パルスが可能な限り短い期間で照射されるように、パルス間隔を狭く、換言すれば繰返し周波数を高くする必要がある。この点でも、パルスレーザの繰返し周波数を1kHz以上、好ましくは100kHz以上に設定する。繰返し周波数が低いとレーザ光が離散的に照射され、導波路の形成に必要な連続的な屈折率変化が得られない。

【0016】繰返し周波数の上限は、無限大の限りなく連続レーザに近いものである。しかし、繰返し周波数を高くすると、一般的にパルス当りのエネルギーが弱くなる。そこで、実際にはガラス材料が屈折率変化を起こす閾値及び使用するレーザの出力によって、繰返し周波数の上限を設定する。繰返し周波数が高い場合、レーザ又

はガラス材料を連続的に相対移動することにより、集光部分の軌跡に連続的な屈折率変化領域が形成される。この屈折率変化領域は、レーザ光照射前のガラスの屈折率より高いことから光導波路として利用される。ガラス材料又はレーザ光の集光点の走査速度を遅くすることにより、ガラス材料に対してレーザ光を連続照射できる。しかし、第1パルス照射後に一定の時間をおいて第2パルスが重なった状態で照射されるため、第1パルスで形成された屈折率変化が第2パルスにより再変化し、滑らかな導波路構造が得られない。

【0017】本発明によるとき、所望の形状を持った光導波路が容易に得られる。しかも、従来の作製工程と異なり、光導波路の作製に使用するレーザ光と非線形光学装置に用いるレーザ光源とを共用できるため、作業の効率化及び作業速度の高速化が可能となる。波長可変のレーザ光源を用いた場合、光導波路作製用の波長と非線形光学装置駆動時の波長を変えることもできる。また、本発明による三次非線形光導波路は、コア部の断面が円形であることから、入射したレーザ光の直線偏波の偏光保持率が高い等の光学特性に優れている。したがって、非線形光学素子として好適に使用され、これを用いて構成

する光スイッチを始めとする非線形光学装置は高速・高効率で動作し、実用に十分供し得る。以下の実施例では、レーザ照射によって三次非線形光学ガラス材料に屈折率変化（線形屈折率の変化）を起こさせ、それにより作製した光導波路及びそれを用いた導波路型超高速光スイッチを中心として説明する。ただし、本発明は、実施例に何ら拘束されるものでなく、要旨を逸脱しない範囲で種々変更可能なことは勿論である。

【0018】

【実施例】所定量の原料を調合して白金ルツボに入れ、1300℃で2時間熔融することにより、表1の組成をもつガラスを作製した。得られたガラスを厚さ0.7mmに鏡面研磨し、次の方法で三次非線形光学特性を測定した。YAGレーザの基本波（波長1.06μm）と色素レーザ（波長約0.7μm）を非線形結晶中でミキシングすることにより得られた波長1.9μmのレーザ光を試料に入射し、発生した波長0.63μmの第3高調波の強度を測定することにより、三次非線形光学感受率 $\chi^{(3)}$ を求めた。

【0019】

表1：実施例で使用した三次非線形光学ガラスの組成

試料番号		1	2	3	4	5	6
成分及び含有量 モル%	$\text{Bi}_2\text{O}_3$	18.9	42.6	66.0	24.0	49.5	49.5
	$\text{B}_2\text{O}_3$	—	28.5	16.6	8.0	25.0	25.0
	$\text{SiO}_2$	56.2	28.5	16.6	50.0	—	—
	$\text{TiO}_2$	8.3	—	—	—	—	—
	$\text{MgO}$	—	—	—	—	25.0	—
	$\text{ZnO}$	—	—	—	—	—	25.0
	$\text{BaO}$	—	—	—	12.0	—	—
	$\text{Li}_2\text{O}$	8.3	—	—	—	—	—
	$\text{Na}_2\text{O}$	8.3	—	—	—	—	—
	$\text{K}_2\text{O}$	—	—	—	6.0	—	—
	$\text{CeO}_2$	—	0.4	0.8	—	0.5	0.5
三次非線形光学感受率 $\chi^{(3)}$ (esu) $\times 10^{-12}$		5.8	12.0	20.0	6.5	15.0	18.0

【0020】以下の各例では、得られたガラスから10

mm×1mm×10mmの直方体形状に切り出した試験

片を導波路作製用に使用した。

#### 【0021】実施例1：光カースイッチ用光導波路の作製

表1における試料番号1, 2のガラスに対し、Arレーザ励起のチタンサファイアレーザから発振されたパルス幅150fs, 繰返し周波数200kHz, 波長800nm, 平均出力1~50mWのパルスレーザ光を使用し、集光レンズで集光し、試験片の内部に集光点が位置するように調節して試験片を照射した。照射後の試験片を観察すると、集光点の屈折率が0.01だけ上昇していた。屈折率の変化は、ナノ秒又はピコ秒オーダーの極く短時間で生じた。試験片又は集光点を連続的に一方向に相対移動させることにより、試験片の内部に直線状の高屈折率領域、すなわち直線状の光導波路が形成された。光導波路の形成如何は、実際に通信波長帯のレーザ光を試験片に入射し、屈折率変化を起こしている部分のみに光が伝播されていることを観測することにより確認できた。また、出射側の近視野像から光導波路の断面が直径(コア径)4μmであること、及び少なくとも通信波長帯域においてシングルモード伝播が実現されていることも判明した。波長800nmのレーザ光に替え、通信波長帯の1.3μmや1.55μmのレーザ光を照射した場合でも、同様の屈折率変化が観測された。光導波路は、使用する集光レンズの焦点距離を変えることによりコア径の大きさが調整可能であった。このようにして形成された光導波路は、コアとクラッドとの間に明確な界面が存在しないので界面損失が極めて少ない。そのため、本発明は、光集積回路等における微細な導波路形成法として活用される。

#### 【0022】実施例2：マッハ・チェンダー型光スイッチ用光導波路の作製

マッハ・チェンダー型光スイッチ用光導波路は、種々の工程で作製できる。たとえば、図4で模式的に示すように、予め4つに切られた基板21~24を用意し、そのうちの一つの基板21のみに三次非線形光学効果の大きな $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 含有ガラスを使用し、残りの3つの基板22~24には石英ガラスのように三次非線形性の小さな材料を使用する。それぞれの基板21~24をレーザ照射することにより光導波路21a~24aを形成させた後、光学接着剤で各基板21~24を貼り合わせる。或いは、図5で模式的に示すように、所定の大きさをもつ一つの基板25を使用する。基板25は、石英ガラスのような非線形性の小さいガラスでできており、三次非線形光学効果の大きな $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 含有ガラス26をスパッタ法等で基板25の一部表面に盛り付ける。次いで、レーザ照射によりマッハ・チェンダー型光導波路25aが基板25に書き込まれる。何れの場合も、基板21~25を搭載した微動台の操作によって、必要形状の光導波路21a~25aが容易に書き込まれる。

【0023】本実施例では、表1に示した試料番号3,

4のガラスを三次非線形光学効果の大きな $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 含有ガラスとして用い、石英ガラスを非線形の小さな材料として使用した。Arレーザ励起のチタンサファイアレーザから発振されたパルス幅150fs, 繰返し周波数200kHz, 波長800nm, 平均出力1~50mWのパルスレーザ光を使用し、集光レンズで集光し、試験片の内部に集光点が位置するように調節して試験片を照射した。集光点の屈折率は、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 含有ガラスでは0.01, 石英ガラスでは0.05だけ上昇した。作製した光導波路の基本性能を調査するため、実際に通信波長帯のレーザ光を光導波路に入射させたところ、屈折率変化を起こしている部分のみに光の伝播が観察され、シングルモード伝播が実現していることが判明した。形成された光導波路は、出射側の近視野像から断面4μmの直径(コア径)をもっていることが判った。三次非線形光学効果の小さな材料として、石英ガラスに替えGeドーパシリカガラスやフッ化物ガラスを使用した場合でも、同様な光導波路が作製された。本実施例で得られた光導波路も、コアとクラッドとの間に明確な界面が存在しないため、界面損失が極めて少ないものであった。

#### 【0024】実施例3：方向性結合器型光スイッチ用光導波路の作製

方向性結合器型光スイッチ用光導波路も、マッハ・チェンダー型と同様に種々の工程で作製できる。たとえば、図6で模式的に示すように、予め4つに切られた基板31~34を用意し、そのうちの一つの基板31のみに三次非線形光学効果の大きな $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 含有ガラス材料を使用し、残りの3つの基板32~34には石英ガラスのように三次非線形光学効果の小さな材料を使用する。それぞれの基板31~34をレーザ照射することにより光導波路31a~34aを形成させた後、光学接着剤で各基板31~34を貼り合わせる。或いは、図7で模式的に示すように、所定の大きさをもつ一つの基板35を使用する。基板35は、石英ガラスのような三次非線形光学効果の小さいガラスでできており、三次非線形光学効果の大きな $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 含有ガラス材料36をスパッタ法等で基板35の一部表面に盛り付ける。次いで、レーザ照射により方向性結合器型光導波路35aが基板35に書き込まれる。何れの場合も、基板31~35を搭載した微動台の操作によって、必要形状の光導波路31a~35aが容易に書き込まれる。

【0025】本実施例では、表1に示した試料番号5, 6のガラスを三次非線形光学効果の大きな材料として、石英ガラスを三次非線形光学効果の小さな材料として使用した。Arレーザ励起のチタンサファイアレーザから発振されたパルス幅150fs, 繰返し周波数200kHz, 波長800nm, 平均出力1~50mWのパルスレーザ光を使用し、集光レンズで集光し、試験片の内部に集光点が位置するように調節して試験片を照射した。集光点の屈折率は、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 含有ガラスでは

0.01, 石英ガラスでは0.05だけ上昇した。作製した光導波路の基本性能を調査するため、実際に通信波長帯のレーザ光を光導波路に入射させたところ、屈折率変化を起こしている部分のみに光の伝播が観察され、シングルモード伝播が実現していることが判明した。形成された光導波路は、出射側の近視野像から断面4 $\mu\text{m}$ の直径(コア径)をもっていることが判った。三次非線形光学効果の小さな材料として、石英ガラスに替えGeドープシリカガラスやフッ化物ガラスを使用した場合でも、同様な光導波路が作製された。本実施例で得られた光導波路も、コアとクラッドとの間に明確な界面が存在しないため、界面損失が極めて少ないものであった。

#### 【0026】実施例4：光カーシャッタスイッチへの適用

実施例1で試料番号2の $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 含有ガラスから作製したコア径4 $\mu\text{m}$ 、長さ10mmの光導波路を用いて光カーシャッタスイッチを構成した。図8は、光カーシャッタスイッチ40の光学系を示し、OPA(optical parametric amplifier)を通過した波長1.30 $\mu\text{m}$ のチタンサファイアレーザ光(パルス幅100fs, 繰返し周波数100Hz)をゲート光 $P_g$ として使用し、光源41からゲート光パルスに同期させた波長1.32 $\mu\text{m}$ 、パルス幅10nsの半導体レーザ光をプローブ光 $P_i$ として出射した。プローブ光 $P_i$ は、 $\lambda/2$ 波長板42により直線偏波の偏光方向をゲート光 $P_g$ の直線偏波の偏光方向に対して $\pi/4$ だけ傾けられ、偏光子43a, ミラー44, レンズ45aを通過して光導波路46に至る。この光学系では、ミラー44によりゲート光 $P_g$ とプローブ光 $P_i$ がコリニア系(共軸系)になっているので、光導波路46をカー媒質として使用することが可能となる。プローブ光 $P_i$ は、光導波路46を通過した後、更にレンズ45b, フィルタ47, 検光子43bを経て検出器48に送られる。検出器48には、光電子増倍管, InGaAs-PINフォトダイオード等が使用される。ゲート光 $P_g$ は、フィルタ47で遮られ、検出器48まで達しない。なお、フィルタ47に替えて分光器を使用することもできる。

【0027】ゲート光 $P_g$ のパワーを調整しスイッチング動作を調査したところ、プローブ光 $P_i$ の通過率T値が式 $T \propto \sin^2(n_{2B}L I_g)$ に従った挙動を示し、図9にみられるように正しく光シャッタ動作を示していることが確認された。位相変化量 $\pi$ も実現され、この結果から本実施例で使用した $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 含有ガラスのカー定数 $n_{2B}$ が $1.1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{W}$ と算出された。通信波長帯には大きな吸収がなく、二光子吸収の影響もみられなかった。通信波長1.5 $\mu\text{m}$ 帯での同様の実験も可能であり、スイッチング動作の際のゲート光照射によるコア部の線形屈折率自体の変化も検出されなかった。また、スイッチングに必要なレーザパワーは、光導波路の作製に必要なパワーと比較して3桁程度小さいもので十

分であった。

【0028】本実施例では、大型のチタンサファイアレーザ光のOPAを経たレーザ光を光源とした。しかし、これに拘束されることなく、小型レーザをゲート光 $P_g$ として駆動させることも可能である。また、市販の半導体レーザ(波長1.30 $\mu\text{m}$ , パルス幅10ns, 繰返し周波数150MHz)をゲート光 $P_g$ として用い、半導体レーザによるプローブ光 $P_i$ を用いても、光カーシャッタ動作が確認され、位相変化量 $\pi$ が達成された。このことから、光学系が大幅にコンパクト化されることが判る。本実施例で用いた光電子増倍管又はPINフォトダイオードでは、それ自体の応答速度がナノ秒で止まってしまう。そこで、プローブ光パルスをゲート光パルスに対して遅延を掛ける一般的な測定手法により、光カーシャッタスイッチの応答速度を調査した。測定の結果、スイッチング速度は、入射したゲート光のパルス幅と同程度以下であり、高速の電子分極効果により光スイッチングが生じていることが確認された。また、二光子吸収や熱効果による低速化、群遅延分散による低速化等が排除されていた。本実施例で採用した光カーシャッタスイッチは、サブピコ秒以下のスイッチングスピードをもつ。そのため、信号光に100GHz以上の変調をかける変調機能、100GHz以上の繰返し周波数をもつ信号光パルス列から任意の信号パルスを取り出し、低繰返しのパルス列に変換するデマルチプレクシング機能、幾つかの低繰返し光パルス列を100GHz以上の光パルス列に多重化するマルチプレクシング機能等を備えた光カーシャッタスイッチとなる。

#### 【0029】実施例5：マッハ・チェンダー型光スイッチへの適用

実施例2で試料番号3の $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 含有ガラスから作製したコア径4 $\mu\text{m}$ 、長さ10mmの光導波路をマッハ・チェンダー型光スイッチに組み込み、光スイッチング実験に供した。マッハ・チェンダー型光スイッチでは、先ず素子の一端に入射したレーザ光を分波し、分波された一方の光波にのみ三次非線形媒質を通過させる、この光波は、三次非線形媒質により位相シフトが与えられた後、位相シフトを与えていない残りの光波と再び合波される。合波の際に、元の出力光に変調が加わった出力光が得られる。

【0030】本実施例では、OPA(optical parametric amplifier)を通過した波長1.35 $\mu\text{m}$ のチタンサファイアレーザ光(パルス幅100fs, 繰返し周波数100Hz)を用い、光電子増倍管又はInGaAs-PINフォトダイオードを検出器として使用した。光スイッチング実験の結果を示した図10にみられるように、当初80%であった出力光が三次非線形光学効果によって変調を受けた結果、20%まで変化しており、光スイッチング動作が実現されていることが判る。また、通信波長帯に大きな吸収がなく、二光子吸収等の影響も



みられなかった。更に、波長 $1.5\mu\text{m}$ 帯でも同様な結果が得られ、スイッチング動作の際にゲート光照射によるコア部の線形屈折率自体の変化も検出されなかった。応答速度に関しても、光カーシャッタスイッチの場合と同様に高速であった。この場合も、二光子吸収や熱効果による低速化や群遅延分散による低速化等が排除された純粋な電子分極効果による高速応答が可能であった。

#### 【0031】実施例6：方向性結合器型光スイッチへの適用

実施例3で試料番号6の $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 含有ガラスから作製されたコア径 $4\mu\text{m}$ 、長さ $10\text{mm}$ の光導波路を方向性結合器型光スイッチに組み込み、光スイッチング実験に供した。方向性結合器型光スイッチは、図11に示すように2本の導波路51、52を十分に近付けたとき一方の導波路51（三次非線形導波路）に入射された光波モードが他方に結合し、両モード間で伝送光エネルギーの移動が起こり、結果として出射端からの光エネルギーがオン・オフされる現象を利用している。

【0032】本実施例では、OPA（optical parametric amplifier）を通過した波長 $1.32\mu\text{m}$ のチタンサファイアレーザ光（パルス幅 $100\text{fs}$ 、繰返し周波数 $100\text{Hz}$ ）を用い、光電子増倍管又は $\text{InGaAs-PI-N}$ フォトダイオードを検出器として使用した。図12の試験結果にみられるように、三次非線形導波路51の出射端における出力 $P_1$ は当初65%であったが、三次非線形光学効果によって結合が起こった結果、55%にまで減少した。逆に、他方の導波路52の出射端における出力 $P_2$ は当初35%であったが、結合によって45%に増加していた。出力 $P_1$ 、 $P_2$ の変化から光スイッチング動作が起こっていることが判る。この場合でも、通信波長帯には大きな吸収がなく、二光子吸収の影響も検出されなかった。波長 $1.5\mu\text{m}$ 帯での実験でも同様な結果が得られ、スイッチング動作の際にゲート光照射によるコア部の線形屈折率自体の変化も検出されなかった。応答速度に関しても、光カーシャッタスイッチの場合と同様に高速であった。この場合も、二光子吸収や熱効果による低速化や群遅延分散による低速化等が排除された純粋な電子分極効果による高速応答が可能であった。

#### 【0033】

【発明の効果】以上に説明したように、本発明の光導波路は、レーザ光の集光照射で光誘起屈折率変化領域を連続的に形成した光導波路を $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 含有ガラス基体の内部に書き込んでいる。そのため、三次元的にも複雑な構造をもつ光導波路が容易に形成される。しかも、この導波路を用いた非線形光学装置は、高能率に動作することは勿論、良好な光学特性等を備えていることから光情

報処理や光通信分野で超高速光スイッチとして重用される。しかも、有害な成分を含んでいないので、環境汚染の問題もない。また、平面型の光導波路とすると、光ファイバ型と異なり、PLC（Planar Lightwave Circuit）等、広い展開を図ることが可能である。しかも、本発明に従った非線形光学装置は、純粋な電子分極効果による三次非線形メカニズムを利用しているので、通信波長帯を含む広い波長範囲でサブピコ秒以下の高速動作を実現できる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明に従った光導波路の作製方法を説明する図

【図2】 集光点の一方向相対移動により形成された光導波路

【図3】 集光点の二方向相対移動により形成された光導波路

【図4】 本発明に従ってマッハ・チェンダー型光スイッチ用の光導波路を作製するプロセスの一例

【図5】 本発明に従ってマッハ・チェンダー型光スイッチ用の光導波路を作製するプロセスの他の例

【図6】 本発明に従って方向性結合器型光スイッチ用の光導波路を作製するプロセスの一例

【図7】 本発明に従って方向性結合器型光スイッチ用の光導波路を作製するプロセスの他の例

【図8】 実施例1で作製した光導波路を組み込んだ光カーシャッタスイッチの光学系

【図9】 同光カーシャッタスイッチの特性を示すグラフ

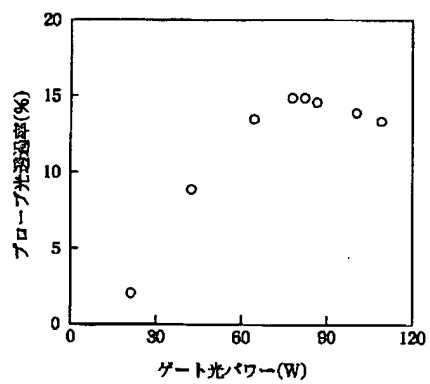
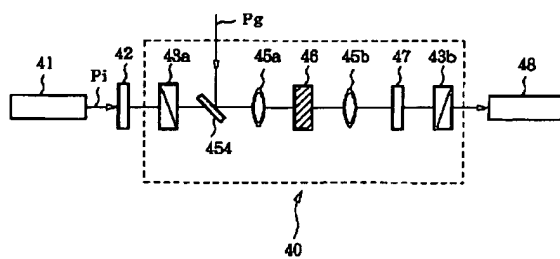
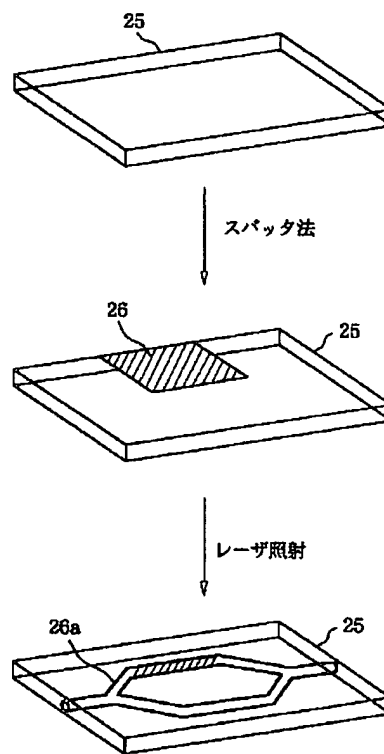
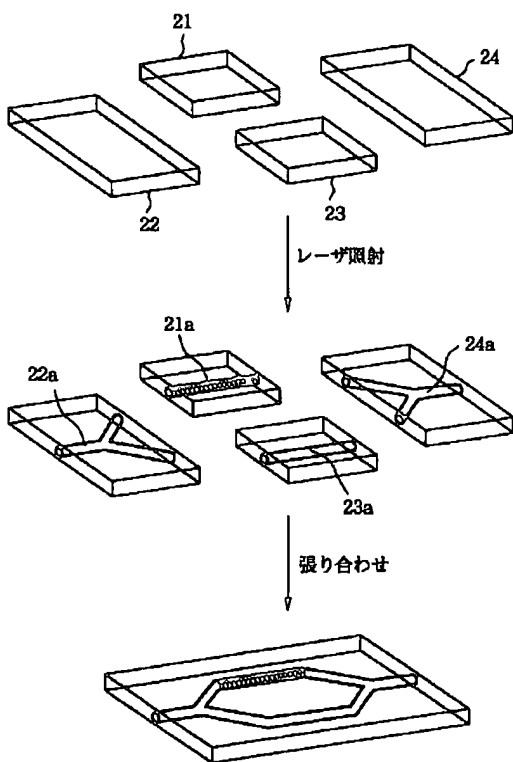
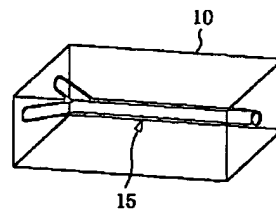
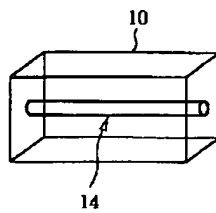
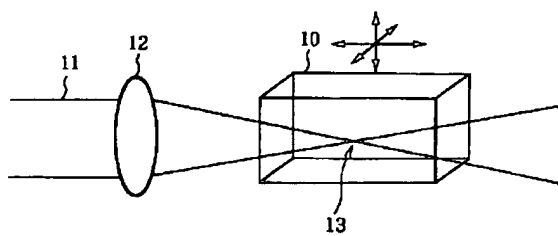
【図10】 実施例2で作製した光導波路を組み込んだマッハ・チェンダー型光スイッチの特性を示すグラフ

【図11】 方向性結合器型光スイッチに組み込まれた光導波路の入力と出力との関係を示す図

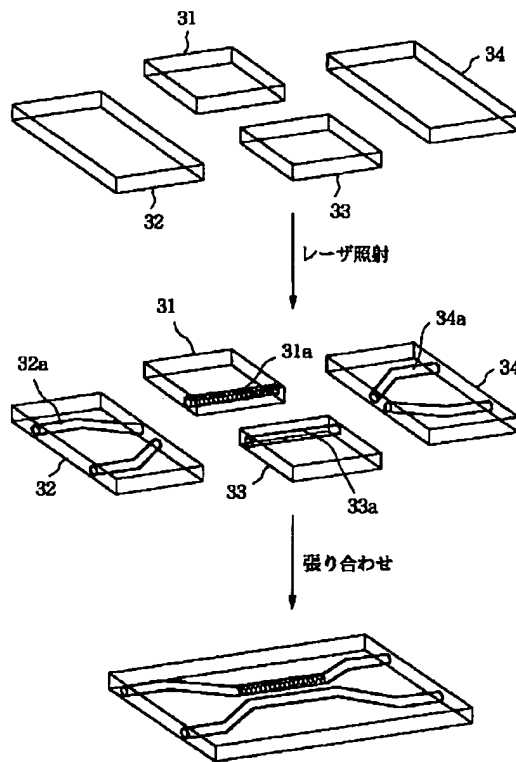
【図12】 実施例6で調査した方向性結合器型光スイッチの特性を示すグラフ

#### 【符号の説明】

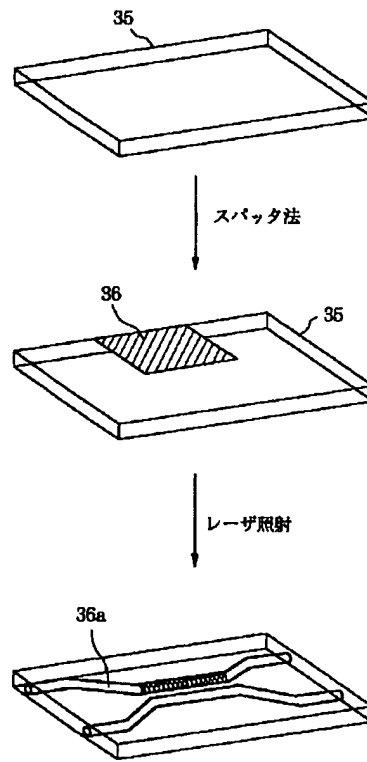
10：ガラス材料    11：レーザ光    12：集光レンズ    13：集光点  
14、15：光導波路  
21～25、31～35：基板    21a～25a、31a～35a：光導波路  
26、36：非線形性の大きな材料  
40：光カーシャッタスイッチ    41：光源    42： $\lambda/2$ 波長板  
43a：偏光子    43b：検光子    44：ミラー  
45a、45b：レンズ    46：光導波路    47：フィルタ    48：検出器  
51：非線形性の導波路    52：通常の導波路



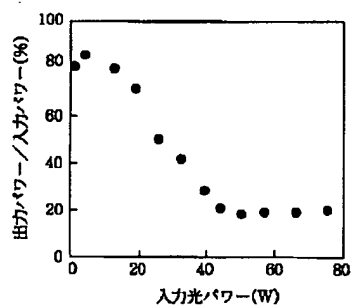
【図6】



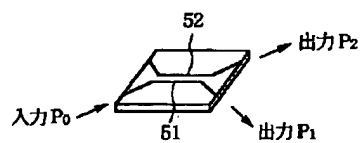
【図7】



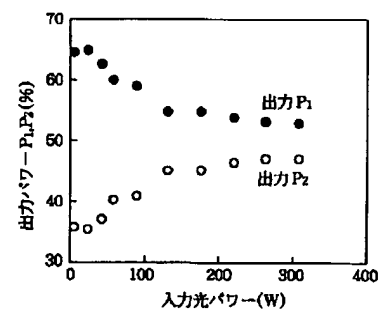
【図10】



【図11】



【図12】



フロントページの続き

(71)出願人 597169487  
 杉本 直樹  
 神奈川県横浜市鶴見区下末吉六丁目11番18号  
 (72)発明者 近藤 裕己  
 奈良県奈良市鶴舞西町二丁目28番303号

(72)発明者 三浦 清貴  
 奈良県奈良市朱雀一丁目13番22号  
 (72)発明者 杉本 直樹  
 神奈川県横浜市鶴見区下末吉六丁目11番18号  
 (72)発明者 平尾 一之  
 京都府相楽郡木津町木津川台三丁目5番8号

**hydrogen**

The general name for the atom H, without regard for its nuclear mass, either for hydrogen in its natural abundance or where it is not desired to distinguish between the isotopes. The systematic name for atomic hydrogen is monohydrogen.

See also *hydron*.

1988, 60, 1116